

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.06.19

岩溶作用碳汇强度变化的土地利用调控规律 ——贵州普定岩溶水-碳通量大型模拟试验场研究

朱辉¹, 曾成^{2,3}, 刘再华^{2,3}, 曾庆睿^{2,3,4}, 李玲珑^{2,3,4}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州省科技厅普定喀斯特研究综合试验站, 贵州 普定 562100; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对野外监测面临的岩溶流域边界难以确定以及多种土地利用混杂在一起的问题, 在贵州普定建设了不同土地利用条件下岩溶水-碳通量大型模拟试验场, 监测研究了不同土地利用条件下的入渗系数和岩溶作用碳汇强度。结果表明, 不同土地利用条件下的入渗系数和岩溶作用碳汇强度差异明显, 径流强度强烈影响着岩溶作用碳汇强度。模拟裸岩地、荒地、农耕地、草地、灌木地的碳汇强度分别为 14.31、12.27、11.79、9.17 和 12.24 t/(km²·a)。与传统认识不同的发现是, 生物量最大的草地, 其岩溶作用碳汇强度最小, 而裸岩地的岩溶作用碳汇强度最大。这表明: 在试验场尺度下, 不同土地利用通过改变径流强度和土壤 CO₂ 含量这两个因素, 对岩溶作用碳汇强度产生影响, 且因水化学的恒定行为, 径流强度决定碳汇强度, 因此在考虑生态系统修复时, 不仅需要考虑到生物量增加带来的增汇效应, 还要考虑到径流强度降低带来的减汇效应。

关键词: 岩溶作用碳汇强度; 土地利用调控; 普定岩溶水-碳通量模拟试验场

中图分类号: P641.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)06-0120-06

Karst-related carbon sink flux variations caused by land use changes: an example from the Puding karst test site in Guizhou

ZHU Hui¹, ZENG Cheng^{2,3}, LIU Zaihua^{2,3}, ZENG Qingrui^{2,3,4}, LI Linglong^{2,3,4}

(1. School of Environment, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Guiyang, Guizhou 550081, China; 3. Puding Comprehensive Karst Research and Experimental Station, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences and Guizhou Science and Technology Department, Puding, Guizhou 562109, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: High-precision evaluation of the difference in karst-related water-carbon flux variations caused by land use changes is important to the evaluation of water resources and carbon sink after the control of rocky desertification. Since there are difficulties in determining the karst basin boundaries and separating different land uses in a field study, the test site were built to monitor the variations in coefficient infiltration and carbon sink flux under different land uses in Puding of Guizhou. It was found that the coefficient infiltration and carbon sink flux differ dramatically under different land uses and run off dominated in the karst-related carbon sink flux. The carbon sink fluxes of the simulated bare rock land, bare land, farm land, grass land and brush land were

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-25

基金项目: 国家 973 重大科学研究计划(2013CB956700); 国家自然科学基金重点项目(41430753); 贵州省科技厅社会攻关计划基金(黔科合 SY 字(2013)3163 号)

第一作者: 朱辉(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩溶生态水文地质。E-mail: zhuhui199001@yahoo.com

通讯作者: 刘再华(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩溶作用动力学和全球变化研究。E-mail: liuzaihua@vip.gyig.ac.cn

14.31, 12.27, 11.79, 9.17 and 12.24t/(km²·a) (C) respectively. An interesting finding is that the grass land with largest biomass had the minimum karst-related carbon sink flux while the bare rock land had the maximum karst-related carbon sink flux. The results indicate that the land use influences the karst-related carbon sink flux by changing the runoff intensity and soil CO₂ induced HCO₃⁻ concentration, but the former plays a leading role because of the chemostatic behavior of HCO₃⁻. In conclusion, we note that the decrease effect on the carbon sink caused by the decrease in run off while restoring the ecosystem should be considered although the increase effect on the carbon sink caused by the increase of biomass is taken into account.

Keywords: karst-related carbon sink flux; land use; Puding karst test site

岩溶地区拥有世界陆地面积的15%,即约2 200 × 10⁴ km²,居住着约十亿人口^[1],我国碳酸盐岩的裸露面积约为91 × 10⁴ km²,加上已知的隐伏于不同深度的碳酸盐岩,其总分布面积可达340 × 10⁴ km²以上^[2]。岩溶动力系统受岩溶环境控制,对环境十分敏感,并且因为碳酸盐溶解的快速动力学,岩溶作用积极参与全球碳循环^[3]。

表层岩溶水对于解决西南岩溶山区居民的干旱缺水问题具有重要意义^[4],因此定量评价气候变化和土地利用变化对岩溶水循环过程的影响意义重大,其次已有学者发现土地利用能显著干扰岩溶作用碳汇的自然过程并取得了大量的成果^[5-8]。在2007年国家启动了岩溶区石漠化综合治理工程并覆盖中国南方近100 × 10⁴ km²国土面积背景下^[9],岩溶系统的水资源安全问题和石漠化治理后的岩溶作用碳汇评价问题显得十分重要,而且阐明气候和土地利用变化如何控制岩溶作用碳汇过程,可以为未来可能实施的土地利用调控岩溶作用碳汇提供科学支撑。

在研究岩溶水系统的水-碳通量的问题时,主要从系统中的水循环和以水为迁移载体的碳循环两个角度考虑。传统方法主要是利用天然岩溶系统,在野外寻找岩溶水系统并在其排泄区建立监测站点,观察水化学和流量变化并通过水化学径流法得到一系列的结果,但是在研究过程中存在许多难以回避的问题,例如流域边界通常难以确定;大部分天然岩溶水系统是非全排型的(流量计算有误差);土地利用类型混杂在一个流域,难以区分各自的影响。另外,存在含水介质等干扰条件,因此不能定量、精确地评价单一土地利用对岩溶碳汇的影响。但是如果人为地控制各种条件,例如使得流域边界、排泄类型、土地利用方式等保持确定性,就可以使得问题的求解变得简单化。

曾成等^[10]提出了建设大型水碳通量模拟试验场的设想,在试验场建设完成一年后,本文将总结试验场土地利用对岩溶系统水-碳通量调控的初步观测结果

和新发现。

1 岩溶作用碳汇通量的传统研究方法、问题与解决方案

传统方法研究岩溶作用碳汇通量主要是通过水化学径流法和溶蚀试片法^[3,5,8]进行。

在水化学径流法中,岩溶作用碳汇通量主要与流量和[DIC]的乘积成正比,与流域面积成反比。虽然计算形式比较简单,但是流域面积和流量确定对于岩溶地区是难以获得的两个参数,通常需要大量的示踪实验和流量观测。

溶蚀试片法是利用统一制作的标准碳酸盐岩试片放置于空中、土壤表面和土壤不同深度,一定时间后取出并称量,通过试片质量的减少量判断岩溶作用强度。虽然溶蚀试片法简单易行,但是由于岩溶土壤的异质性,该方法代表性较差,需要埋放大量试片。此外,因为土壤中碳酸盐的存在,具有侵蚀性的雨水到达试片时侵蚀性已经大大降低,甚至不具有侵蚀性^[11],因此该方法不适用于碳酸盐丰富的干旱地区中,或存在碳酸盐岩碎屑的湿润地区。

鉴于上面两种方法不具有普遍应用性,刘再华研究员在此基础上推导出岩溶作用及其碳汇强度计算的“入渗-平衡化学法”^[12]。该方法是利用碳酸盐快速的溶解动力学特征,即只要知道相关地区的基本气候资料,如温度、降水、蒸发、蒸腾等数据即可算出该地区的岩溶作用及其碳汇强度。

1.1 野外岩溶作用碳汇通量研究中遇到的问题

土壤在岩溶作用与岩溶生态系统中扮演着极其重要的角色,是CO₂的重要发生源^[13],土壤有机质和土壤微生物对碳酸盐岩溶蚀具明显的促进作用,植被的存在无疑会改变土壤的物理化学性质,因此土地利用变化对岩溶作用碳汇有重要影响。土地利用方式的改变将导致覆被类型的变化,包括森林转换为草地或农田、草地转换为农田以及退耕还林草等^[14]。

表层岩溶带处于四大圈层的交汇带,碳—水—钙循环活跃,溶蚀和沉积化学反应都比较迅速,岩溶作用强烈而且对环境变化具有敏感性,表层岩溶带快速地岩溶过程以及对环境变化的敏感性赋存大量短时间尺度的环境变化信息,并且表层岩溶带的水资源调蓄功能是未来重点研究方向之一,因此表层岩溶带成为了研究气候变化和土地利用对岩溶水—碳通量影响的重点。

在运用水化学—径流法进行岩溶水—碳通量研究中,前人主要选择野外岩溶系统排泄处作为监测点,以具有不同土地利用类型的表层岩溶泉系统为水文水化学监测对象,开展相应的水文地质调查工作以获取流域面积信息,研究气候和土地利用对岩溶水系统水资源量和水中溶解无机碳浓度的影响。但不同尺度岩溶水系统和不同岩溶水系统之间的水文地质参数和气候环境参数之间有很大差异。例如:岩溶水流系统因其特殊性,在不同降雨强度条件下其系统边界可能发生变化,而岩溶含水系统因其面积尺度较大,常会带来局部小气候、土地利用多样、含水层介质种类多样等问题,系统水量也难以把握(常为非全排型)。以上因素会对定量评价工作带来很大影响。

1.2 解决方案及试验场建设情况

鉴于野外岩溶系统存在很多难以克服的问题,曾成等^[10]提出了岩溶水—碳通量大型模拟试验场的构想,以控制变量法为主体思想,通过人为控制水文地质条件,排除其它干扰因素,突出气候变化和土地利用作用,从而定量研究气候变化和土地利用对岩溶水—碳通量的控制作用。

实际建设过程中,在贵州省安顺市普定县沙湾建设了5块20 m×5 m×3 m(长宽高)钢混结构的水池模拟系统边界,池体表面涂抹环氧树脂并铺设HDPE膜使边界隔水(材料不会与地下水发生反应),采集普定县陈旗的中三叠关岭组石灰岩模拟岩溶含水介质结构(因成本原因,试验使用碎石,未能模拟管道流),水池(裸岩地除外)石灰岩上部铺设50 cm厚石灰土(模拟石漠化治理后的坡耕地)并种植不同种类植物,设置水文及土壤CO₂观测孔,铺设排水管网以模拟表层岩溶泉出流,从而开展不同土地利用(裸岩地、荒地、农耕地、草地和灌木地)对岩溶水—碳通量影响的试验研究(图1、2)。

试验场1号池为裸岩地,未覆盖土壤,2号池到5号池的土地利用类型依次为荒地、农耕地、草地和灌木地。2014年1月在5号灌木地扦插刺梨苗并在4号

池播撒紫花苜蓿种子,3月份补撒紫花苜蓿种子并在3号池种植玉米并撒化肥,5月份补种玉米,7月份在农耕地套种青豆。

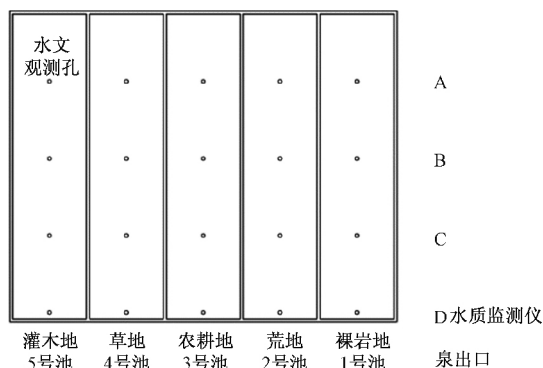


图1 普定岩溶水—碳通量模拟试验场模型平面结构图

Fig. 1 Plane structure of the Puding test site



图2 试验场全景图

Fig. 2 Panorama of the test site

2 模拟试验场运行情况

2.1 测试方法

(1) 采用 Eureka 公司 Manta2 Sub2.0 型多参数水质自动记录仪,分别监测出口断面水位、电导率、pH 和水温,监测频率为1次/15 min,其精度分别为0.01 m、0.1 μS/cm、0.01 和 0.1 °C,电导率为由温度自动补偿至 25 °C 时的值。

(2) 利用 WTW 公司 WTW-3430 型水质测试仪,分别测定出口断面电导率、pH 和水温,其精度分别为 0.1 μS/cm、0.01 和 0.1 °C,电导率为由温度自动补偿至 25 °C 时的值。

(3) 采用 Davis 公司 Weatherlink Vantage Pro2 型气象站,测定试验场的气象数据,并辅以人工记录数据交叉对比。测定气温和降雨等数据,监测频率为1次/30 min,其精度分别为 0.1 °C 和 0.2 mm。

(4) 采用 VAISALA 公司 VAISALA MI70 型手持式土壤 CO₂ 测定仪,测定不同土地利用条件下土壤 CO₂ 的变化情况。测定频率为1次/月,其精度为 10 ppmV。

(5) 现场滴定,采用 Merck 公司 Aquamerck 碱、硬度测试盒测定 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度,精度分别为 0.1 mmol/L (6.1 mg/L) 和 2 mg/L。

2.2 流量控制

由于岩溶作用碳汇强度 CSF 与流量 Q 和重碳酸根浓度 $[\text{HCO}_3^-]$ 的乘积成正比,为定量评价各系统碳汇通量,流量需要精确获得,原先的设想是使用水阀控制流量、流量计记录流量,这就要求在试验场运行之前计算出设计流量,以保障全年不断流。

试验场集雨面积为 100 m^2 ($5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$),平均年降水量约为 1500 mm,按入渗系数 0.4 计,则年平均流量约为 1.9 mL/s (6.849L/h),考虑到旱季和雨季差异,旱季流量还要更低。

在实际操作过程中因精度问题,水阀和流量计读数误差较大,根据黄儒钦等编著的《水力学教程》^[15] 中的长管水力公式(式 1),设计出利用水位差控制流量的装置(图 3)。

$$Q = \frac{A}{\lambda} \cdot \sqrt{2g\Delta H} \quad (1)$$

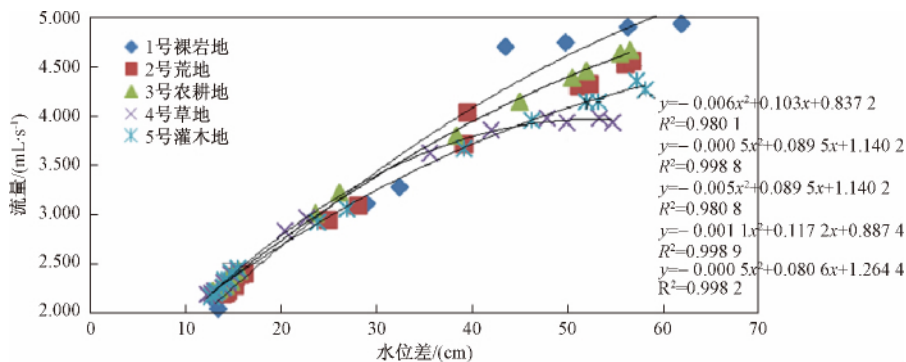


图4 水池流量与水位差关系

Fig. 4 Relationship between discharge and water level difference

2.3 $[\text{HCO}_3^-]$ 的获取

以往研究中发现,岩溶水的 $[\text{HCO}_3^-]$ 常常与电导率之间有良好的相关性,对降雨的响应也比较明显。设想利用仪器高分辨率地监测水化学数据,并且以此为基础高分辨率地得到 $[\text{HCO}_3^-]$ 的相关数据,最终使碳通量的精确计算得以实现。

但在试验场的实际运行阶段发现,因为水池水位较高,蓄水较多,上覆土层较厚,即使在暴雨期间,电导率也无明显变化,一方面反映各模拟系统对水化学具有较大的调蓄功能,另一方面与所谓的水化学恒定行为有关^[16],即水化学浓度变化幅度远小于流量的变化幅度,故通过电导率推算 $[\text{HCO}_3^-]$ 值也显得比较困难

式中: Q ——流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

λ ——阻力系数;

A ——出水管面积/(m^2);

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

ΔH ——水位差/cm。

由式(1)可知,流量 Q 与水位差 ΔH 平方根成正比,实际测算过程中,流量与水位差有良好的相关性(图 4),通过水池内的自动水位计可以推算出水位差,进而可以高分辨率地得出流量值 Q 。

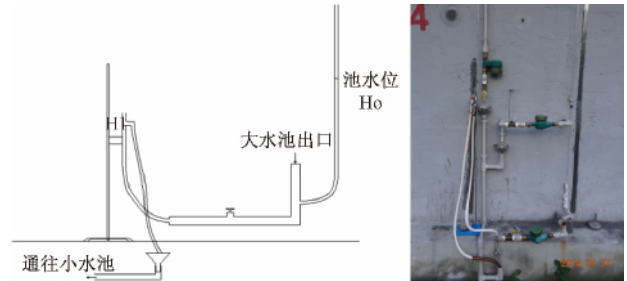


图3 试验场流量控制装置

Fig. 3 Water flow-control device of the test site

(精度较差)。最后通过高频率定期人工现场滴定 $[\text{HCO}_3^-]$ 作为岩溶作用碳汇通量计算依据。

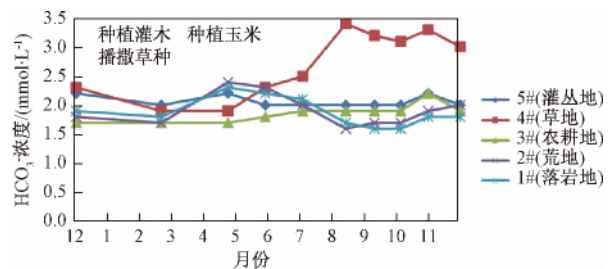


图5 2014年 $[\text{HCO}_3^-]$ 变化图

Fig. 5 Variations in concentration of HCO_3^- in 2014

3 结果与分析

由图 5 可以看出当草地、灌丛和耕地在 6 月份达到相当的生物量后, $[HCO_3^-]$ 从大到小依次为草地、灌丛地、农耕地、荒地及裸岩地。由于草地生长茂密,生物量最大,根系呼吸产生的 CO_2 量也最多,因此模拟的泉出口 HCO_3^- 浓度最高。灌丛地和农耕地因为植

表 1 试验场各土地利用条件下的入渗系数(2014. 8—2014. 12)

Table 1 Infiltration coefficient of precipitation under different land uses

水池编号	降雨总量/mm	孔隙度	初时刻水位差/m	结束时刻水位差/m	流量/ m^3	入渗系数
1 号裸岩地			0.230	0.342	23.214	0.883
2 号荒地			0.254	0.135	28.668	0.717
3 号农耕地	338.9	0.4918	0.264	0.120	27.826	0.655
4 号草地			0.295	0.028	22.423	0.309
5 号灌木地			0.260	0.154	26.853	0.680

总体来说,除了 4 号草地以外,各土地利用条件下的降雨入渗补给系数 α 偏大,这是因为试验场模拟的土地其坡度为 0,很难出现坡面产流的现象,相应地,入渗到岩溶含水层的水量就会偏大,最终导致降雨入渗补给系数大于一般岩溶水系统。由表 1 可以看出,入渗系数从大到小分别为裸岩地、荒地、灌木地、农耕地和草地。其中裸岩地因雨水可以快速入渗,其入渗系数可达 0.8 以上;荒地因其无植被覆盖,入渗系数较农耕地和灌木地较大;草地因其生物量最大,植物散发最高,同时降雨期截留雨水较多,其入渗系数仅有 0.309。虽然本次降雨入渗系数的测算时间长度未达

表 2 试验场各土地利用条件下岩溶作用碳汇通量估算

Table 2 Estimation of karst-related carbon sink flux at the Puding Simulation Test Site under different land uses

水池编号	1 号裸岩地	2 号荒地	3 号农耕地	4 号草地	5 号灌木地
降雨量/mm			1500		
入渗系数	0.883	0.717	0.655	0.309	0.680
平均土壤 CO_2 浓度/ppmV	无土壤覆被	373	590	2131	699
$[HCO_3^-]$ /($mmol \cdot L^{-1}$)	1.8	1.9	2	3.3	2
岩溶作用碳汇通量/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)(C)	14.31	12.27	11.79	9.17	12.24

由表 2 可以看出,在试验场尺度内,碳汇强度主要由径流强度控制,1 号裸岩地虽然 $[HCO_3^-]$ 最低,但因其降雨几乎全部入渗,其总的碳汇强度在五中土地利用类型中最高;4 号草地虽然生物量最大,泉口 $[HCO_3^-]$ 也最高,但因其入渗系数最低,其总的岩溶作用碳汇强度反而最低。因此,在大的流域尺度内,草地内是否有局部小气候效应带来碳汇强度增加需要进一步的工作。

4 结论与建议

(1) 水-碳通量模拟试验场能够精准测定土地利

用条件对岩溶系统水资源量的影响。

株之间间隔较大,总的生物量相对于草地较少, HCO_3^- 浓度也较低。荒地无植被但因为土壤微生物的作用其 HCO_3^- 浓度相对于裸岩地偏高。

因为试验场运行初期需要种植植物及调试,试验场正式运作从 2014 年 8 月中旬开始,在以后的四个月里,记录了水位、流量和降雨量的变化情况,以此为基础,计算这一段时间的各土地利用条件下的降雨入渗系数(表 1)。

一个水文年,但仍可看出不同土地利用类型之间入渗系数差异极大。

根据得到的 $[HCO_3^-]$ 数据、入渗系数和降雨量对各土地利用条件下的碳汇强度进行了估算,结果见表 2。

$$CSF = 0.5 \times 12 \cdot H \cdot C \quad (2)$$

式中: CSF ——碳汇强度/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)(以纯 C 计);

H ——年径流深/($m \cdot a^{-1}$);

C —— HCO_3^- 浓度/($mmol \cdot L^{-1}$);

12——C 的分子量;

0.5——碳酸盐矿物溶解形成的 HCO_3^- 中只有一半是大气(土壤)成因的碳。

用条件对岩溶系统水资源量的影响。

(2) 土地利用类型通过对土壤 CO_2 量和径流强度控制岩溶作用碳汇强度,在试验场尺度内,径流因素更重要。

(3) 植被的存在不仅会通过增加生物量带来增汇效应,还会通过降低水循环强度带来减汇效应。在试验场尺度内,水循环强度因子占据主导作用。但从试验场尺度扩大到流域尺度时,局部小气候导致的增汇效应是否存在还需做进一步的工作和验证。

受客观条件限制,本研究时间尺度较短,观察试验场的年际变化需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 蔡桂鸿,袁道先. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988. [CAI G H, YUAN D X. Karst environment [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1988. (in Chinese)]
- [2] 李大通,罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量[J]. 中国岩溶,1983,2(2):61-64. [LI D T, LUO Y. Measurement of carbonate rocks distribution area in china [J]. Carsologica Sinica, 1983, 2(2): 61-64. (in Chinese)]
- [3] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. 科学通报,2012,57(2/3):95-102. [LIU Z H. New progress and prospects in the study of rock-weathering-related carbon sinks [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(2/3): 95-102. (in Chinese)]
- [4] 蒋忠诚,袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报,1999,20(3):302-308. [JIANG Z C, YUAN D X. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20(3): 302-308. (in Chinese)]
- [5] LIU Z H, Dreybrodt W, Wang H J. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3/4): 162-172.
- [6] 邓新辉,蒋忠诚. 广西弄拉森林植被的喀斯特效应[J]. 地球与环境,2007,35(2):128-133. [DENG X H, JIANG Z C. Karst effect of forest vegetation in Nongla, Guangxi [J]. Earth and Environment, 2007, 35(2): 128-133. (in Chinese)]
- [7] Raymond P A, Turner R E. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River [J]. Environmental Geology, 2008, 45(1): 449-452.
- [8] LIU Z H. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink [J]. Environmental Geology, 2000, 39(9): 1053-1058.
- [9] 蒋忠诚,裴建国,夏日元. 我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动[J]. 中国岩溶,2010,29(4):349-354. [JIANG Z C, PEI J G, XIA R Y. Progresses and important activities of karst research during the 11th Five Year Plan in China [J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(4): 349-354. (in Chinese)]
- [10] 曾成,刘再华. 建设岩溶水—碳通量大型模拟试验场的构想[J]. 资源环境与工程,2013,27(2):196-200. [ZENG C, LIU Z H. Ideas of construction of simulation test field of karst water and carbon fluxes [J]. Resources Environment & Engineering, 2013, 27(2): 196-200. (in Chinese)]
- [11] 曾成,赵敏,杨睿,等. 岩溶作用碳汇强度计算的溶蚀试片法和水化学径流法比较——以陈旗岩溶泉域为例[J]. 水文地质工程地质,2014,41(1):106-111. [ZENG C, ZHAO M, YANG R, et al. Comparison of karst processes-related carbon sink intensity calculated by carbonate rock tablet test and solute load method: a case study in the Chenqi karst spring system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 106-111 (in Chinese)]
- [12] 刘再华. 岩溶作用及其碳汇强度计算的“入渗—平衡化学法”——兼论水化学径流法和溶蚀试片法[J]. 中国岩溶,2011,30(4):17-20. [LIU Z H. “Method of maximum potential dissolution” to calculate the intensity of karst process and the relevant carbon sink: with discussions on methods of solute load and carbonate-rock-tablet test [J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(4): 17-20. (in Chinese)]
- [13] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展,2003,18(1):37-44. [CAO J H, YUAN D X, PAN G X. Some soil features in karst ecosystem [J]. Advance in earth sciences, 2003, 18(1): 37-44. (in Chinese)]
- [14] 莫彬,曹建华,徐祥明. 岩溶山区不同土地利用方式对土壤活性有机碳动态的影响[J]. 生态环境,2006,15(6):1224-1230. [MO B, CAO J H, XU X M. Changes of soil active organic carbon under different land use types in karst area [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1224-1230. (in Chinese)]
- [15] 黄儒钦,禹华谦,陈春光,等. 水力学教程[M]. 3版. 成都:西南交通大学出版社,2006:50-67. [HUANG R Q, YU H Q, CHEN C G. Hydraulics tutorial [M]. 3rd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006: 50-67. (in Chinese)]
- [16] GODSEY S E, KIRCHNER J W, CLOW D W. Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments [J]. Hydrological Processes, 2009, 23: 1844-1864.
- [17] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应[J]. 科学通报,2011,56(26):2174-2180. [ZHANG C. Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect [J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(26): 2174-2180. (in Chinese)]

责任编辑:张若琳